DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.8.14 **中图分类号**：TN386 **文献标志码**：A

基于开通瞬态漏源电压的 SiC MOSFET 结温监测方法

董慧芬[1,2]，李 婵[1]，陈周帅[3]，刘松名[1]
(1.中国民航大学电子信息与自动化学院，天津 300300；2.天津市城市空中交通系统技术与装备重点实验室，天津 300300；3.芯派电子科技股份有限公司，西安 710075)

摘要：针对 SiC 金属-氧化物半导体场效应晶体管 SiC MOSFET(SiC metal-oxide-semiconductor field-effect transistor)结温监测方法普遍存在适用性低和监测困难的问题，提出一种基于开通瞬态漏源电压的 SiC MOSFET 结温监测方法。由于开通过程中存在功率回路电感，因此开通瞬态漏源电压可以反映电流变化率，通过理论推导得出开通瞬态漏源电压与结温呈负相关。在此基础上，利用双脉冲实验，建立了基于开通瞬态漏源电压的结温估计模型。与实际温度相比，利用该模型得到的结温具有较高的精度，同时所选择的温敏电参数在开通过程中呈现了负载无关性的特点，且该方法测量和校准简单、无需破坏器件本身，因此适用范围更广。

关键词：SiC 金属-氧化物半导体场效应晶体管；可靠性；结温监测；开通瞬态漏源电压；温敏电参数

Junction Temperature Monitoring Method for SiC MOSFET Based on Turn-on Transient Drain-source Voltage

DONG Huifen[1,2], LI Chan[1],CHEN Zhoushuai[3], LIU Songming[1]
(1. College of Electronic Information and Automation,Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
2. Key Laboratory of Technology and Equipment of Tianjin Urban Air Transportation System, Tianjin 300300, China;
3. Semipower Technology Co.,Ltd., Xi'an 710075, China)

Abstract: Aimed at the widespread problems of low applicability and difficult monitoring in SiC metal-oxide-semiconductor field-effect transistor (SiC MOSFET) junction temperature monitoring methods, a junction temperature monitoring method based on turn-on transient drain-source voltage is proposed. Due to the existence of power loop inductance during the turn-on process, the turn-on transient drain-source voltage can reflect the change rate of current, and it is negatively correlated with the junction temperature through theoretical deduction. On this basis, a junction temperature estimation model based on turn-on transient drain-source voltage is established using a double-pulse test. Compared with the actual temperature, the junction temperature obtained by the junction temperature estimation model has higher accuracy, while the selected temperature sensitive electrical parameters show load-independence during the turn-on process. In addition, this method is simple to measure and calibrate without destroying the device itself, so it has a wider range of applications.

Keywords: SiC metal-oxide-semiconductor field-effect transistor (SiC MOSFET); reliability; junction temperature monitoring; turn-on transient drain-source voltage; temperature sensitive electrical parameter

收稿日期：2024-09-12；**修回日期**：2024-11-12，2024-12-16；
录用日期：2025-02-05；**网络首发日期**：2025-02-14
基金项目：2023 年民航局安全能力建设资助项目(230324042)；天津市城市空中交通系统技术与装备重点实验室开放基金资助项目(TJKL-UAM-202401)
This work is supported by the 2023 Civil Aviation Administration of China Safety Capacity Building Project under the grant 230324042; the Open Fund of Tianjin Key Laboratory of Urban Air Traffic System Technology and Equipment under the grant TJKL-UAM-202401

SiC 器件凭借其耐高温、耐高压、高频和低损耗的特性受到了广泛关注[1-2]，虽然其在电动汽车、航空航天、轨道交通和电网等电力电子系统中应用

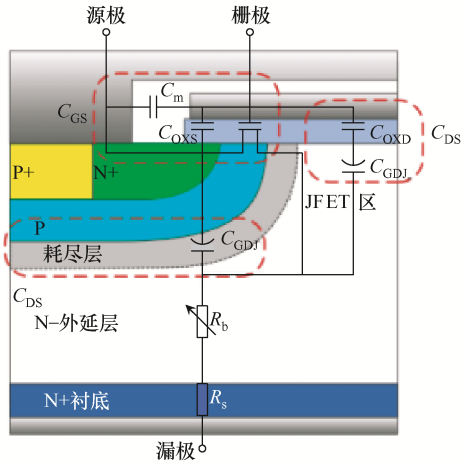
前景广阔[3-4]，但其在可靠性方面也面临更高的要求与更大的挑战。据统计，功率器件在变流系统中失效率最高，约为 34%[5]，而造成功率器件失效的主要原因是结温的变化，占比高达 55%[6]。因此，对功率器件结温的提取与在线监测尤为重要，这对提高其可靠性具有重要意义。

目前，结温监测常用的方法主要有 4 类：物理接触法[7]、光学测量法[8]、热网络法[9]和温敏电参数 TSEPs(temperature sensitive electrical parameters)[10]法。关于 TSEPs 提取 SiC 金属氧化物半导体场效应晶体管 SiC MOSFET(SiC metal-oxide-semiconductor field-effect transistor)的结温，文献[11]提出一种基于通态电压的结温监测方法，但该方法易受负载电流和器件老化的影响，因此测量精度不高；文献[12-13]利用导通电阻 $R_{DS(on)}$来监测结温，然而与 Si 器件相比，SiC MOSFET 具有更低的载流子浓度与更宽的禁带间隙，在同功率等级下阻值更小的 $R_{DS(on)}$使其对结温的敏感性也有所下降，从而影响测量的准确性；文献[14]提出了准阈值电压的概念，通过捕捉开通瞬间辅助开尔文源 S′与源极 S 之间寄生电感电压 $U_{SS'}$的上升沿，得到导通时刻，从而获得准阈值电压；在此基础上，文献[15]设计了基于动态阈值电压的检测电路，该电路最大的优点是不受负载电流的影响，但是在捕捉 $U_{SS'}$上升沿时易受到外界干扰，且仅适用于具有 S′的功率器件，对检测电路也提出了更高的要求；因为开通延迟时间 $t_{d,on}$ 与结温具有良好的线性关系，文献[16]选择将 $t_{d,on}$ 作为温敏电参数来反映结温，但为了获得较为准确的测量结果，需要在栅极驱动回路上串联极大的电阻来降低开通速度，考虑到实际应用场景，这显然是不可行的；文献[17]和文献[18]针对关断瞬态过程，分别提出了基于漏极电流下降时间 t_{fi} 和漏源电压下降沿时间 $t_{f,edge}$ 的结温提取方法，参数与结温也具有良好的线性关系，但参数会受到负载电流变化的影响；文献[19]利用开通瞬态漏极电流 I_D 来监测结温，在电流上升阶段开关损耗低，I_D 易获取，但同样会受到负载变化的影响。

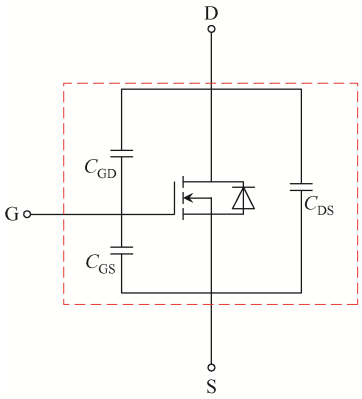
综上，近年来国内外学者对 SiC MOSFET 结温监测方法的研究颇有成效，但是考虑到实际工程应用，此类研究依然面临着一些挑战。例如，SiC MOSFET 较低的载流子迁移率导致某些温敏电参数的灵敏度偏低，其更快的开关速度对温敏电参数的精确测量提出了更高的要求。因此，本文提出一种将开通瞬态漏源电压 $U_{DS,M}$ 作为 TSEPs 的 SiC MOSFET 结温监测方法，建立关于 $U_{DS,M}$ 的结温估计模型，并搭建双脉冲测试平台进行验证。

1　SiC MOSFET 开通瞬态过程分析

图 1(a)为 1 200 V SiC MOSFET 结构，主要由电极、栅极氧化层、N−外延层、N+衬底、JFET 区、P 阱和空间电荷区组成的平面栅组成；图 1(b)为其对应的等效电路，在其栅极、漏极和源极之间存在



(a) SiC MOSFET的结构



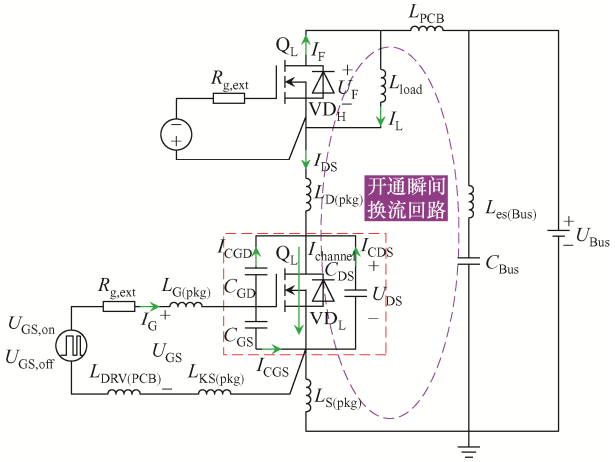
(b) SiC MOSFET的等效电路

图 1　SiC MOSFET 的结构和等效电路

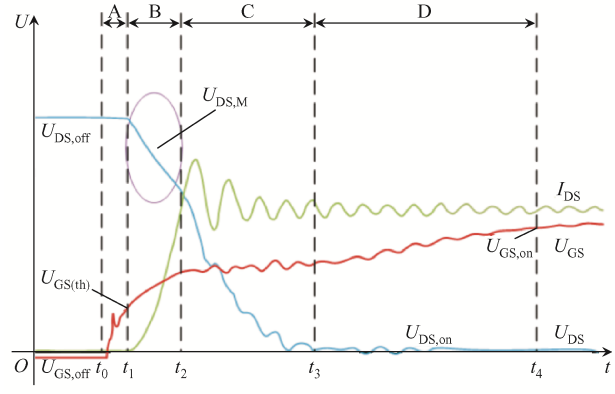
Fig. 1 Structure and equivalent circuit of SiC MOSFET

寄生电容，定义输入电容 $C_{iss}=C_{GS}+C_{GD}$、输出电容 $C_{oss}=C_{GD}+C_{DS}$、反向传输电容 $C_{rss}=C_{GD}$，其中，C_{GS}、C_{GD}、C_{DS} 分别为栅源电容、栅漏电容、漏源电容。

图 2(a)为开通过程等效电路，该电路考虑了线路与器件内部的寄生参数，由其得到的 SiC MOSFET 开通过程波形如图 2(b)所示。图中：U_{GS} 为栅源电压；$U_{GS,on}$ 为完全开通时的栅极驱动电压；$U_{GS(th)}$ 为阈值电压；$U_{GS,off}$ 完全关断时的栅极驱动电压；I_{DS} 为漏源电流；$L_{D(pkg)}$、$L_{S(pkg)}$、L_{PCB} 和 $L_{es(Bus)}$ 分别为漏极、源极器件封装电感、PCB 走线电感和母线电容等效串联电感；$I_{channel}$ 为沟道电流；U_{DS} 为漏源电压；$U_{DS,on}$ 为通态电压；$U_{DS,off}$ 为 SiC MOSFET 完全关断时的漏源电压；U_{Bus} 为输入直流母线电压。



(a) 开通过程等效电路



(b) 开通过程波形

图 2 SiC MOSFET 开通过程等效电路和波形

Fig. 2 Equivalent circuit and waveforms of SiC MOSFET during turn-on process

开通过程可以分为 A~D 4 个阶段：①阶段 A(t_0, t_1)为开通延迟阶段，驱动电压由负变为正，驱动电路通过驱动电流向 C_{iss} 充电，但此时 SiC MOSFET 仍处于关断状态，U_{DS} 和 I_{DS} 均保持不变，直到 t_1 时刻 U_{GS} 达到 $U_{GS(th)}$；②阶段 B(t_1, t_2)为电流上升阶段，SiC MOSFET 开始导通，处于饱和区，I_{DS} 迅速增大，直到 t_2 时刻达到峰值，同时 U_{DS} 降低；③阶段 C(t_2, t_3)为 U_{DS} 下降阶段，t_2 时刻高侧二极 VD_H 开始关断，U_{DS} 快速降低；④阶段 D(t_3, t_4)为导通阶段，此时 U_{DS} 降低为 $U_{DS,on}$，U_{GS} 在驱动电路的作用下达到 $U_{GS,on}$。可知，阶段 B 和 C 均经历了 U_{DS} 的降低：在阶段 B 中 U_{DS} 的降低，是 I_{DS} 迅速增大导致电流变化率 $\mathrm{d}I_{DS}/\mathrm{d}t$ 较大，继而在主功率换流回路的电感上产生压降导致的；相较于阶段 B，阶段 C 中 U_{DS} 降低的幅度较大、速率较快，当 U_{DS} 较高时，C_{GD} 基本不变，而在 U_{DS} 降低时，C_{GD} 随着 U_{DS} 的降低显著增大，从而影响结温测量的准确性。因此，本文选择阶段 B 对应的 $U_{DS,M}$ 作为温敏电参数来提取结温。

2 基于 $U_{DS,M}$ 的结温估计方法

2.1 $U_{DS,M}$ 与 $\mathrm{d}I_{DS}/\mathrm{d}t$ 的关系

针对阶段 B(t_1, t_2)，SiC MOSFET 处于饱和区，等效电路如图 2(a)所示。由第 1 节的分析可知，此阶段 I_{DS} 迅速增大，但换流回路的存在势必会在回路电感内产生压降，从而造成 $U_{DS,M}$ 降低，此阶段的 $U_{DS,M}$ 可表示为

$$U_{DS,M}=U_{DS,off}-L_{loop}\cdot\frac{\mathrm{d}I_{DS}}{\mathrm{d}t} \tag{1}$$

式中，L_{loop} 为功率回路寄生电感，可表示为

$$L_{loop}=L_{D(pkg)}+L_{S(pkg)}+L_{PCB}+L_{es(Bus)} \tag{2}$$

在实际的应用电路中，$U_{DS,off}\approx U_{Bus}$，且 L_{loop} 随温度的变化不明显。因此，$U_{DS,M}$ 与 $\mathrm{d}I_{DS}/\mathrm{d}t$ 有关。

2.2 电流变化率 $\mathrm{d}I_{DS}/\mathrm{d}t$ 与结温 T 的关系

根据基尔霍夫电流定律 KCL(Kirchhoff's current law)可得

$$I_{DS}=I_{channel}-C_{GD}\left|\frac{d(U_{GS}-U_{DS})}{dt}\right|-C_{DS}\left|\frac{dU_{DS}}{dt}\right| \tag{3}$$

由第 2.1 节的分析可知 C_{GD} 和 C_{DS} 受 U_{DS} 的影响较大：U_{DS} 较低时，电容随 U_{DS} 的升高而减小；U_{DS} 较高时，电容不再随 U_{DS} 变化，且 C_{DS}>>C_{GD}。在阶段 B，由于 U_{DS} 较高，C_{GD} 和 C_{DS} 相对较小，且 dU_{DS}/dt 较低，因此 $I_{channel}$ 在 I_{DS} 中起决定作用，式(3)可近似为

$$I_{DS}\approx I_{channel} \tag{4}$$

而 $I_{channel}$ 受 U_{GS} 控制，其表达式为

$$I_{channel}=\frac{\mu_n C_{ox} Z_{ch}}{2L_{ch}}(U_{GS}-U_{GS(th)})^2 \tag{5}$$

式中：μ_n 为载流子迁移率，与 T 有关；C_{ox} 为单位面积的栅氧电容，$C_{ox}=\varepsilon_{ox}/t_{ox}$，$\varepsilon_{ox}$ 为 SiO_2 层的介电常数，t_{ox} 为栅氧厚度，可见 C_{ox} 与温度无关；Z_{ch}、L_{ch} 分别为沟道的宽度和长度。

在阶段 B，U_{GS} 可表示为

$$U_{GS}=U_{GS,on}-(U_{GS,on}-U_{GS,off})e^{\frac{-t}{R_G C_{iss}}} \tag{6}$$

式中：R_G 为栅极驱动电阻；t 为阶段 B 的某一时刻，与 T 有关。

因此，结合式(4)~式(6)可得

$$\frac{dI_{DS}}{dt}=\frac{\mu_n C_{ox} Z_{ch}}{L_{ch}}(U_{GS}-U_{GS(th)})\cdot\frac{(U_{GS,on}-U_{GS,off})}{R_G C_{iss}}e^{\frac{-t}{R_G C_{iss}}} \tag{7}$$

其中，$U_{GS(th)}$ 与半导体器件参数和 T 有关，可表示为

$$U_{GS(th)}=\phi_{ms}-\frac{Q_{ss}}{C_{ox}}+2\psi_B+\frac{\sqrt{4\varepsilon_{SiC}qN_A\psi_B}}{C_{ox}} \tag{8}$$

$$\psi_B=\frac{k_b T}{q}\ln\left(\frac{N_A}{n_i(T)}\right) \tag{9}$$

$$\phi_{ms}=3\frac{k_b T}{q}\ln T-1.332 \tag{10}$$

式中：ϕ_{ms} 为金属栅−衬底的功函数差；Q_{ss} 为 SiO_2-SiC 界面固定电荷量；ψ_B 为费米势；ε_{SiC} 为介电常数，$\varepsilon_{SiC}=\varepsilon_0\cdot\varepsilon_{r(SiC)}$；$q$ 为空间电荷区电荷量；N_A 为衬底的掺杂浓度；k_b 为玻尔兹曼常数；$n_i(T)$为本征载流子浓度，$n_i(T)=(N_c N_V)^{1/2}e^{-E_g/2k_b T}$，$N_c$ 为导带有效态浓度，N_V 为价带有效态浓度，E_g 为禁带宽度。

结合式(7)~式(10)，并在相同时间 t(t=C(定值))下比较，可得半导体器件参数、T、dI_{DS}/dt 与 $U_{DS,M}$ 之间的影响关系，如图 3 所示。可以看出，温度升高会引起半导体器件参数 μ_n 与 n_i 的变化，映射到可测量的电参数上，具体表现为 $U_{GS(th)}$降低、dI_{DS}/dt 变大和 $U_{DS,M}$ 降低。因此，利用 $U_{DS,M}$ 监测结温是可行的，且与 T 呈负相关。

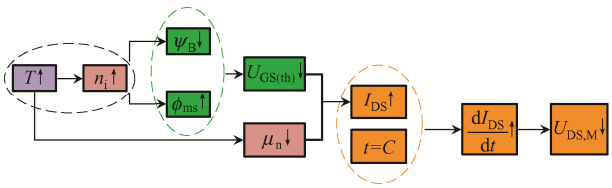


图 3　$U_{DS,M}$ 的温度依赖性

Fig. 3 Temperature-dependence of $U_{DS,M}$

3　$U_{DS,M}$ 监测 T 的可行性验证

利用 LTspice 仿真软件搭建双脉冲仿真平台，用于验证所提方法的可行性。该平台相关参数见表 1，SiC MOSFET 选用 C3M0040120K。

表 1　双脉冲仿真平台有关参数设置

Tab. 1 Setting of parameters for dual-pulse simulation platform

参数	数值
$U_{GS,on}$/V	15
$U_{GS,off}$/V	−4
$R_{g,int}$/Ω	3.51
第一个脉冲宽度/μs	4
第二个脉冲宽度/μs	1
$R_{g,ext}$/Ω	10

3.1　$U_{DS,M}$ 与负载电感的关系

通过双脉冲仿真平台探究负载电感变化对 $U_{DS,M}$ 的影响，将待测器件的 T 和 U_{Bus} 分别设置为 50 ℃和 300 V，负载电感分别为 50、75、100 和

150 μH，与之相对应的负载电流分别为 24、16、12 和 8 A，得到不同负载电感下开通过程的 $U_{DS,M}$ 电压波形，如图 4 所示。由图可知，开通瞬态过程中 $U_{DS,M}$ 不随负载的变化而变化，进一步证明了此阶段电压的下降是由换流回路中功率回路电感的存在造成的。

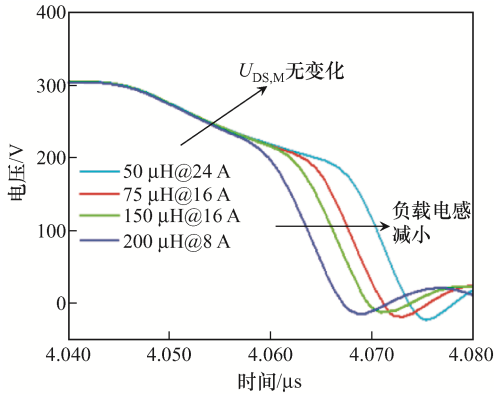


图 4 负载电感变化对 $U_{DS,M}$ 影响的结果波形

Fig. 4 Result waveforms of effect of load inductance variation on $U_{DS,M}$

3.2 $U_{DS,M}$ 与 L_{loop} 的关系

利用双脉冲仿真平台验证 L_{loop} 变化对 $U_{DS,M}$ 的影响，将待测器件的 T 和 U_{Bus} 分别设置为 50 ℃和 300 V，且固定负载电感为 50 μH，改变 L_{loop}，将其由 30 nH 变化至 45 nH，增量为 5 nH，得到的电压波形如图 5 所示。由图可知，随着 L_{loop} 的增大 $U_{DS,M}$ 降低，这说明 L_{loop} 的变化会影响 $U_{DS,M}$ 测量的准确性，从而造成结温监测偏差。

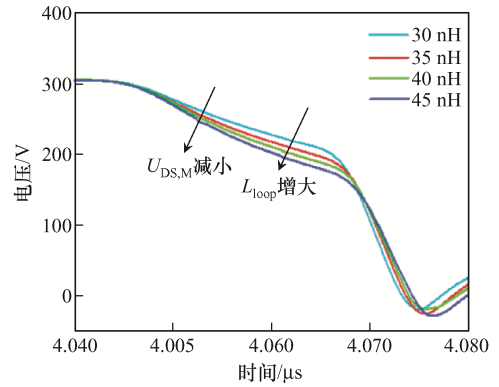


图 5 L_{loop} 对 $U_{DS,M}$ 影响的结果波形

Fig. 5 Result waveforms effect of power loop inductance variations on $U_{DS,M}$

3.3 $U_{DS,M}$ 与 U_{Bus} 的关系

将负载电感固定为 50 μH，L_{loop} 设置为 30 nH，待测器件 T 设置为 50 ℃，改变 U_{Bus}，将其由 240 V 变化至 320 V，以 20 V 为间隔进行等间隔测量，分析不同 U_{Bus} 对 $U_{DS,M}$ 的影响，结果波形如图 6 所示。由图可知，随着 U_{Bus} 增大，$U_{DS,M}$ 也增大，这表明 U_{Bus} 的波动会导致 $U_{DS,M}$ 产生测量偏差，从而影响结温监测准确性。因此，后续需要考虑 U_{Bus} 的变化。

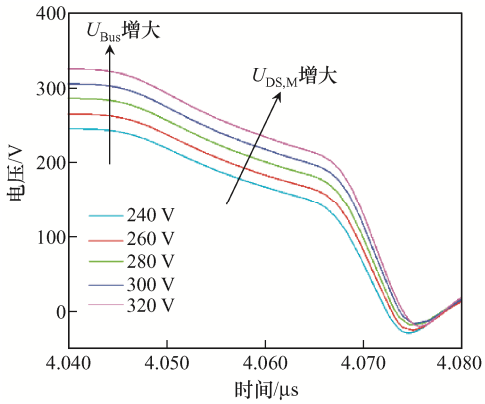


图 6 U_{Bus} 变化对 $U_{DS,M}$ 影响的结果波形

Fig. 6 Result waveforms of effect of U_{Bus} variation on $U_{DS,M}$

3.4 dI_{DS}/dt 与 T 的关系

在 U_{Bus} 为 300 V，负载电感为 50 μH 的条件下，改变待测器件的 T，以 25 ℃为起始结温，间隔量为 25 ℃，最大结温为 150 ℃，分别测量不同 T 下 I_{DS} 的双脉冲波形，如图 7 所示。由图可知，在开通瞬态过程中，同一时刻，随着 T 的升高，I_{DS} 变大。为了清楚地体现 dI_{DS}/dt 与 T 的关系，对图 7 开通过程中的电流数据进行微分，得到不同 T 下的

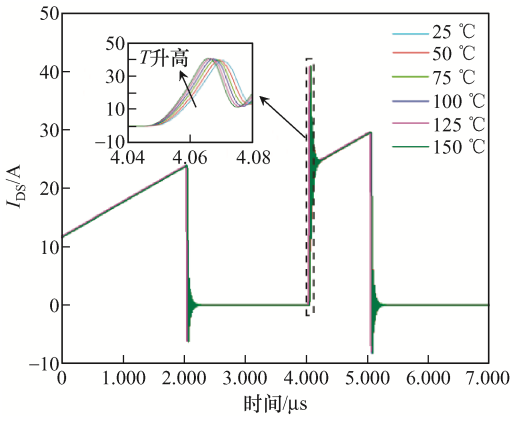


图 7 不同 T 下 I_{DS} 的波形和局部放大

Fig. 7 Waveforms of I_{DS} and local amplification at different T

dI_{DS}/dt，如图 8 所示。由图可知，同一时刻 T 越高，dI_{DS}/dt 越大，dI_{DS}/dt 与 T 呈正相关，与理论分析一致。

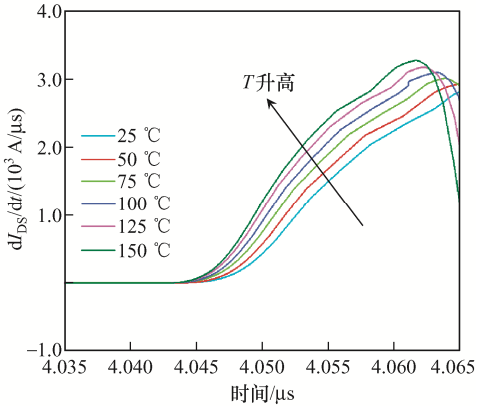


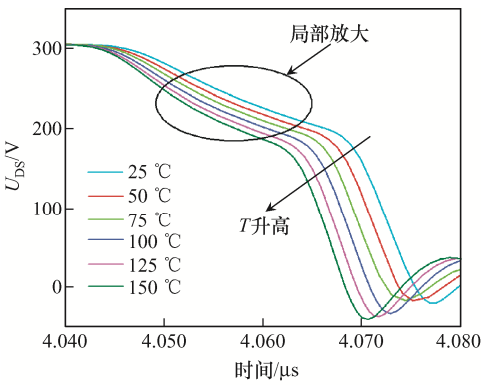
图 8　开通瞬态过程中不同 T 下的 dI_{DS}/dt 波形

Fig. 8 Waveforms of dI_{DS}/dt during turn-on transient process at different T

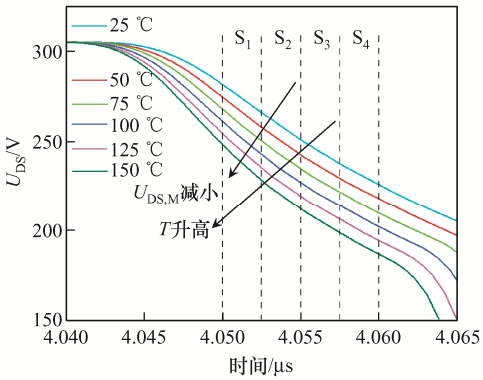
3.5 $U_{DS,M}$ 与 T 的关系

为进一步验证 $U_{DS,M}$ 与 T 的关系，将负载电感设置为 50 μH，U_{Bus} 设置为 300 V，将待测器件初始 T 设置为 25 ℃，间隔量为 25 ℃，最大结温为 150 ℃，得到不同 T 下开通过程 U_{DS} 的波形，如图 9 所示。由图可知，在同一时刻，$U_{DS,M}$ 随 T 的升高而减小，与 T 呈负相关。

由第 3 节分析总结可知，影响 $U_{DS,M}$ 测量准确性的因素主要为 L_{Loop} 和 U_{Bus} 的变化。对于固定的实验平台，L_{Loop} 为定值，因此不会对 $U_{DS,M}$ 测量的准确性造成影响；若更换实验平台，则需要对 T 标定系数重新校准，从而提高 T 监测的性能。针对 U_{Bus} 变化引起的测量不准确问题，可以建立 T、U_{Bus} 和 $U_{DS,M}$ 三者之间的关系，以消除 U_{Bus} 变化对 T 监测结果的影响。



(a) U_{DS}随T变化的曲线



(b) 局部放大

图 9　不同温度下开通过程的 U_{DS} 波形

Fig. 9 Waveforms of U_{DS} during turn-on process at different temperatures

4　实验验证与结果分析

在双脉冲仿真平台的基础上，搭建双脉冲实物平台，用来进一步验证所研究方法在实际应用中结温监测的性能。

4.1 双脉冲测试平台

图 10 为双脉冲实物平台(Keysight PD1500A)，该测试平台采用 2 个型号为 C3M0040120K 的 SiC MOSFET 单管作为续流二极管，其中下管作为待测器件、上管保持关断；采用型号为 EVO 1500-1400 flo 的高压直流电源提供测试所需电压；采用直流母线电容(144 μF)稳定电源电压，以提高供电质量；采用

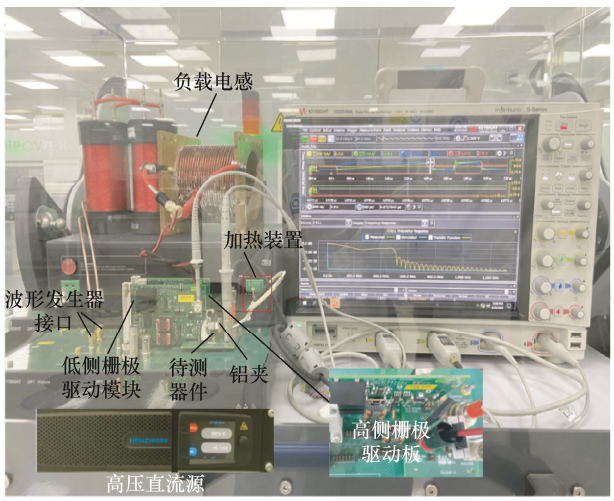


图 10　双脉冲平台实物

Fig. 10 Physical of dual-pulse platform

型号为33512B的波形发生器作用于栅极驱动板来提供栅极驱动电压；采用型号为 Keysight DSOS104A 的示波器采集开通瞬态波形；采用带有集成 K 型热电偶的加热装置模拟温度的变化，并通过铝夹将加热装置连接到待测器件，从而实现对温度的监控；负载电感为空芯电感，可以通过改变电感来模拟不同负载变化的情况。该实验平台的相关参数设置同仿真，见表 1。

4.2 实验数据采集与所研究方法结温关系的拟合

改变 U_{Bus}，将其由 240 V 增加至 320 V，间隔量为 20 V；并将待测器件的 T 由 25 ℃变化至 150 ℃，间隔量为 25 ℃，得到不同 U_{Bus}、不同 T 下的 U_{DS} 和 I_{DS} 波形，如图 11 所示(以 U_{Bus}=280 V 为例)。

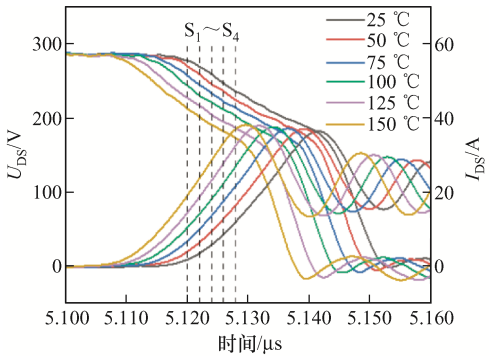


图 11 U_{Bus} 为 280 V 时，U_{DS} 和 I_{DS} 随 T 变化的结果波形

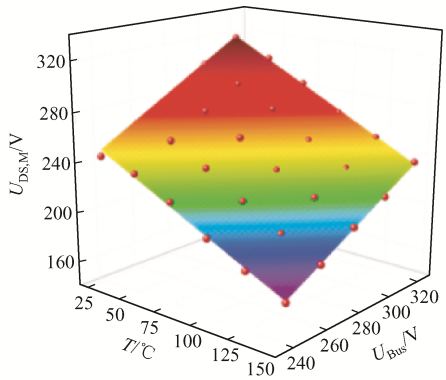
Fig.11 Result waveforms of U_{DS} and I_{DS}variations with T when U_{Bus} is 280 V

为了获得更加准确的结温估计模型，将 U_{DS} 波形分为 S_1~S_4 4 个阶段，阶段的起始时间为 5.120 μs，时间间隔为 2 ns。分别计算每个阶段不同 U_{Bus}、不同 T 下对应的 $U_{\mathrm{DS,M}}$ 的平均值，可以得到不同阶段下 $U_{\mathrm{DS,M}}$、U_{Bus} 和 T 三者之间的关系散点图，接着对三者的关系进行拟合，得到图 12 所示的拟合结果。

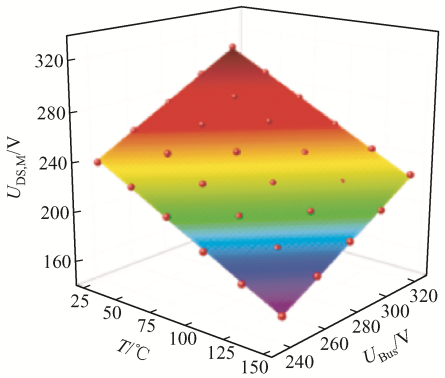
S_1~S_4 阶段的拟合关系式分别为

$$U_{\mathrm{DS,M}} = 52.873\,04 - 0.484\,07T + 0.878\,13U_{\mathrm{Bus}} - 0.000\,507\,713TU_{\mathrm{Bus}} \tag{11}$$

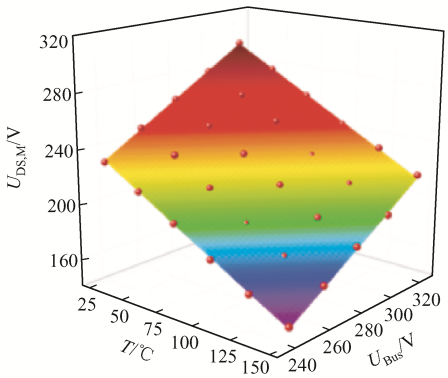
$$U_{\mathrm{DS,M}} = 53.887\,94 - 0.580\,53T + 0.841\,75U_{\mathrm{Bus}} - 0.000\,217\,553TU_{\mathrm{Bus}} \tag{12}$$



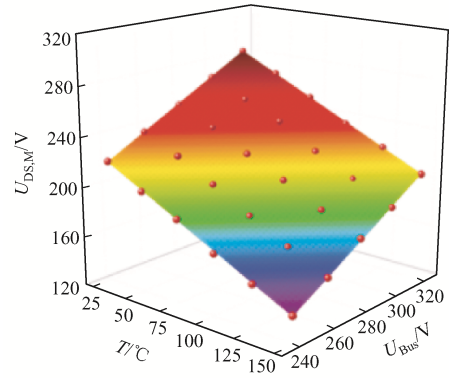
(a) S_1阶段拟合后



(b) S_2阶段拟合后



(c) S_3阶段拟合后



(d) S_4阶段拟合后

图 12 不同阶段 $U_{\mathrm{DS,M}}$、U_{Bus} 和 T 三者的拟合结果

Fig. 12 Results of fitting among $U_{\mathrm{DS,M}}$, U_{Bus} and T at different stages

$$U_{\mathrm{DS,M}} = 54.614\,76 - 0.689\,26T + 0.795\,34U_{\mathrm{Bus}} + 0.000\,227\,297TU_{\mathrm{Bus}} \tag{13}$$

$$U_{\mathrm{DS,M}} = 38.005\,3 - 0.658\,58T + 0.812\,46U_{\mathrm{Bus}} + 0.000\,175\,637TU_{\mathrm{Bus}} \tag{14}$$

S_1~S_4 对应的拟合度分别为 99.51%、99.81%、99.82%和 99.87%，将其进行对比后，选择基于 S_4 数据拟合得到的表达式作为结温估计模型，可表示为

$$T = \frac{U_{\mathrm{DS,M}} - 38.005\,3 - 0.812\,46U_{\mathrm{Bus}}}{-0.658\,58 + 0.000\,175\,637U_{\mathrm{Bus}}} \tag{15}$$

4.3 验证本文所提方法的性能

4.3.1 灵敏度

为了比较不同 U_{Bus} 对 $U_{\mathrm{DS,M}}$ 灵敏度的影响，将 U_{Bus} 由 240 V 增加至 320 V，间隔电压为 20 V，得到不同 U_{Bus} 下 $U_{\mathrm{DS,M}}$ 的灵敏度。此外，将其与文献[19]所提的结温监测方法进行比较，结果如图 13 所示。由图可知，U_{Bus} 从 240 V 变化至 320 V，对应的 $U_{\mathrm{DS,M}}$ 灵敏度分别为 0.61 V/℃、0.61 V/℃、0.58 V/℃、0.60 V/℃和 0.60 V/℃，这表明输入电压的变化对 $U_{\mathrm{DS,M}}$ 灵敏度的影响极小。与文献[19]所提方法相比，本文所提方法具有更高的灵敏度。

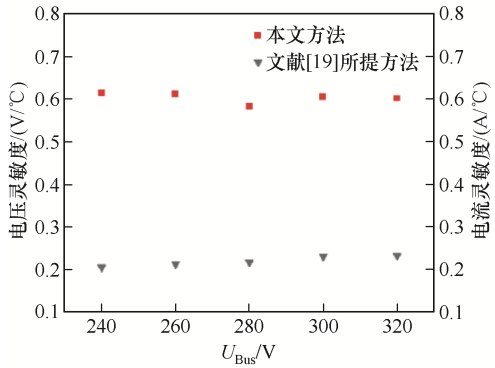


图 13　不同 U_{Bus} 下，不同结温监测方法灵敏度对比

Fig. 13 Comparison of sensitivity among different junction temperature monitoring methods at different values of U_{Bus}

4.3.2 准确性

将本文所提的结温估计模型与实际结温进行比较，结果如图 14 所示，其中，估计结温 1 是用 S_4 阶段 $U_{\mathrm{DS,M}}$ 的均值计算得到的、估计结温 2 是用该阶段 $U_{\mathrm{DS,M}}$ 的中值得到的。无论是用均值还是中值计算结温，其与实际结温相比，误差均在 4 ℃以内。考虑到实际应用，可用该阶段 $U_{\mathrm{DS,M}}$ 的中值作为结温估计的电参数值。

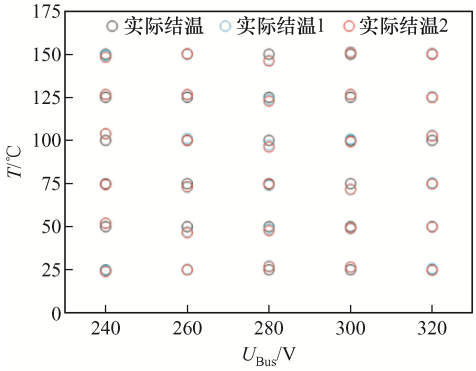


图 14　不同 U_{Bus} 下本文方法的结温估计结果

Fig. 14 Results of junction temperature estimated using proposed method at different values of U_{Bus}

此外，基于同平台、同型号器件将本文所提方法与文献[16]所提的开通延迟时间法和文献[19]所提的开通瞬态漏源电流法进行比较，结果见表 2。器件结温从 60 ℃变化到 115 ℃，本文所提方法、开通延迟时间法[16]和开通瞬态漏源电流法[19]对应的最大误差分别为 3.6 ℃、6.5 ℃和−5.1 ℃，绝对均值误差分别为 2.2 ℃、4.7 ℃和 4.6 ℃。综合考虑，本文方法的灵敏度高、准确性较好，且不受负载变化的影响，适用范围更广。

表 2　不同结温监测方法性能对比结果

Tab. 2 Comparison results of performance among different junction temperature monitoring methods

℃

方法	实际结温	估计结温	估计误差
本文所提方法	60	61.1	1.1
	90	91.8	1.8
	115	118.6	3.6
开通延迟时间法[16]	60	58.4	−1.6
	90	96.5	6.5
	115	120.9	5.9
开通瞬态漏源电流法[19]	60	56.2	−3.8
	90	85.2	−4.8
	115	109.9	−5.1

5 结论

本文提出了一种基于开通瞬态漏源电压的 SiC MOSFET 结温估计方法，首先利用理论分析得到 $U_{DS,M}$ 与 T 呈负相关，然后选用型号为 C3M0040120K 的 SiC MOSFET 在双脉冲测试平台上进行实验验证，最终得出以下结论。

(1)$U_{DS,M}$ 在开通瞬态过程中几乎不受负载变化的影响，从而体现出利用 $U_{DS,M}$ 估计 T 的可行性与准确性。

(2)为了进一步提高结温估计模型的准确性，分别测试了在同一负载、不同 U_{Bus} 和不同 T 下的开通瞬态漏源波形，建立了 $U_{DS,M}$、U_{Bus} 和 T 的关系，得到了结温估计模型，并将该模型计算的结果与实际结果对比，得到误差均在 4 ℃内、灵敏度约为 0.6 V/℃。

(3)与开通延迟时间法[16]和开通瞬态漏源电流法[19]相比，本文所提方法具有较高的精度和灵敏度。在可实现性方面，具有易测量的优点，可为结温监测提供有效的解决方案，便于后续对电力电子变换系统的热管理，从而提高系统的可靠性。

(4)本文所提方法是通过在采集 U_{DS} 数据时，利用高精度、高采样率的示波器实现的。但是面对 SiC 功率器件高开关频率、高功率密度的实际应用场合，需要设计高分辨率、高精度且高集成度的小型采样设备来保证所提方法结温监测的性能。

参考文献：

[1] 王来利. “宽禁带功率半导体器件封装集成技术与可靠性优化研究”专题特约主编寄语[J]. 电工技术学报, 2025, 40(16): 5011-5012.
Wang Laili. Message from the special editor-in-chief of “research on packaging integration technology and reliability optimization of wide bandgap power semiconductor devices” [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(16): 5011-5012. (in Chinese)

[2] 李东润, 宁圃奇, 康玉慧, 等. 采用大芯片的高功率密度 SiC 功率模块设计[J]. 电源学报, 2024, 22(3): 93-99.
Li Dongrun, Ning Puqi, Kang Yuhui, et al. Design of high powerdensity SiC power module with large chips [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(3): 93-99. (in Chinese)

[3] 姜杰俊, 刘青, 韩伟健, 等. 宽温域下的 SiC MOSFET 开关暂态建模方法研究[J]. 电工技术学报, 2025,40(20): 6591-6603.
Jiang Jiejun, Liu Qing, Han Weijian, et al. Research on switching transient modeling method of SiC MOSFET in wide temperature range [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(20): 6591-6603. (in Chinese)

[4] 周野, 薛征宇, 鲜亮, 等. 基于漏源电压脉冲检测的 SiC MOSFET 短路检测电路[J]. 电工技术学报, 2026, 41(10): 3314-3326.
Zhou Ye, Xue Zhengyu, Xian Liang, et al. A short-circuit detection circuit for SiC MOSFET based on drain-source voltage pulse monitoring [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2026, 41(10): 3314-3326. (in Chinese)

[5] Yang Shaoyong, Bryant A, Mawby P, et al. An industry-based survey of reliability in power electronic converters [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(3): 1441-1451.

[6] Wang Huai, Liserre M, Blaabjerg F. Toward reliable power electronics: Challenges, design tools, and opportunities [J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2013, 7(2): 17-26.

[7] 刘平, 李海鹏, 苗轶如, 等. 基于内置温度传感器的碳化硅功率模块结温在线提取方法[J]. 电工技术学报, 2021, 36(12): 2522-2534.
Liu Ping, Li Haipeng, Miao Yiru, et al. Online junction temperature extraction for SiC module based on built-in temperature sensor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(12): 2522-2534. (in Chinese)

[8] Baker N, Dupont L, Munk-Nielsen S, et al. IR camera validation of IGBT junction temperature measurement via peak gate current [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(4): 3099-3111.

[9] 王兆萍, 信金蕾,杜明星. 混合热网络模型的构建及其结温估计方法[J]. 电源学报, 2024, 22(3): 30-37.
Wang Zhaoping, Xin Jinlei, Du Mingxing. Construction of hybrid thermal network model and estimation method for its junction temperature [J]. Journal of Power Supply,

2024, 22(3): 30-37. (in Chinese)

[10] 吴涛, 孙鹏, 赵志斌, 等. 基于温敏电参数的碳化硅 MOSFET 结温测量方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(11): 3904-3915.
Wu Tao, Sun Peng, Zhao Zhibin, et al. A review of junction temperature measurement methods of SiC MOSFET by temperature-sensitive electrical parameters [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(11): 3904-3915. (in Chinese)

[11] Fritz N, Kamp T, Polom T A, et al. Evaluating on-state voltage and junction temperature monitoring concepts for wide-bandgap semiconductor devices [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(6): 7550-7561.

[12] Yu Bin, Wang Li, Ahmed D. Drain-source voltage clamp circuit for online accurate ON-state resistance measurement of SiC MOSFETs in DC solid-state power controller [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(1): 331-342.

[13] Zhang Qinghao, Lu Geye, Yang Yanyong, et al. A high-frequency online junction temperature monitoring method for SiC mosfets based on on-state resistance with aging compensation [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(7): 7393-7405.

[14] Yu Hengyu, Jiang Xi, Chen Jianjun, et al. A novel real-time junction temperature monitoring circuit for SiC MOSFET [C]// 2020 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). New Orleans, LA, USA, 2020: 2605-2609.

[15] Jiang Xi, Wang Jun, Yu Hengyu, et al. Online junction temperature measurement for SiC MOSFET based on dynamic threshold voltage extraction [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(4): 3757-3768.

[16] Yang Fei, Pu Shi, Xu Chi, et al. Turn-on delay based real-time junction temperature measurement for SiC MOSFETs with aging compensation [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(2): 1280-1294.

[17] Wei Weiwei, Zhu Wei, Liu Tao, et al. Junction temperature online extraction method for power MOSFET by current fall time [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2022, 69(7): 3811-3819.

[18] Wang Ying, Jiang Xi, Shi Xinlong, et al. Online junction temperature estimation for SiC MOSFETs using drain voltage falling edge time [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2023, 70(10): 5228-5235.

[19] Du Mingxing, Xin Jinlei, Wang Hongbin, et al. Estimating junction temperature of SiC MOSFET using its drain current during turn-on transient [J]. IEEE Transac- tions on Electron Devices, 2020, 67(5): 1911-1918.



董慧芬

作者简介：

董慧芬(1970—)，女，博士，副教授。研究方向：航空电气装置故障诊断、故障预测研究，航空电气系统可靠性与适航研究。E-mail：hfdong@cauc.edu.cn。

李婵(1997—)，女，通信作者，硕士研究生。研究方向：功率器件可靠性，电机控制器可靠性。E-mail：2022022186@cauc.edu.cn。

陈周帅(1987—)，男，本科，工程师。研究方向：功率器件性能表征、测试方法研究。E-mail：chenzhoushuai@semipower.com.cn。

刘松名(2000—)，男，硕士研究生。研究方向：电机控制器可靠性。E-mail：2023022270@cauc.edu.cn。

(责任编辑：孙美菊)